



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN  
DE INGENIEROS EN LA  
ERA DIGITAL



# **DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS EN TECHO PARA CARACTERIZAR EL DESEMPEÑO DE TURBINAS EÓLICAS DE EJE VERTICAL**

**Cristian Pachón, Sebastián Cortés, Nicolás Cuevas, Sebastián Cancelado, Javier Urbano, Miguel Montoya, Ángela Bermúdez, Camilo Hernández**

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Bogotá, Colombia**

## **Resumen**

El aprovechamiento del recurso eólico por medio de turbinas ha venido en auge en los últimos años debido a los requerimientos mundiales de no dependencia de los combustibles fósiles. El diseño de las turbinas eólicas tiene diferentes configuraciones y variables que requieren ponerse a prueba en condiciones reales de operación. En este trabajo, se presenta el diseño de una herramienta de evaluación de prototipos de turbinas eólicas en condiciones reales de operación, que es un equipo requerido por diseñadores de turbinas para evaluar la eficiencia de los desarrollos propuestos. Se muestra el proceso de diseño, fabricación e instalación de un banco de pruebas en techo para caracterizar el desempeño de tres turbinas eólicas de eje vertical en funcionamiento continuo bajo condiciones atmosféricas reales. Durante el diseño estructural del banco se analizaron las cargas a las que se somete la estructura por efecto de las fuerzas del viento en condiciones de operación normal y extrema. Adicionalmente, se diseñó un sistema de adquisición de datos, fundamental para la caracterización del desempeño de las turbinas. Este sistema incluye un sistema eléctrico para generar carga al generador de turbina, la instalación de sensores y la protección de los elementos electrónicos contra condiciones ambientales.

El diseño propuesto de banco de pruebas se construyó e instaló en la terraza del edificio de laboratorios en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Este banco de pruebas actualmente es la herramienta fundamental para validar el funcionamiento en condiciones reales de prototipos de turbinas eólicas de eje vertical comerciales y diseñadas por el grupo de investigación DSIM (Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica). En el banco de pruebas se pueden medir la potencia eléctrica generada por las turbinas y la velocidad de rotación de la misma, datos, que, en combinación con mediciones de velocidad de viento adquiridos mediante una estación

meteorológica, son el insumo para la caracterización del desempeño de las turbinas eólicas de eje vertical.

**Palabras clave:** turbina eólica de eje vertical; estructura metálica; banco de pruebas; diseño mecánico

### **Abstract**

*The use of the wind resource by means of turbines has come largely in recent years due to the global requirements of non-dependence on fossil fuels. The design of wind turbines has different configurations and variables that require testing under real operating conditions. In this work, the design of a prototype evaluation tool for wind turbines under real operating conditions is presented, which is a device required by turbine designers to evaluate the efficiency of the proposed developments. It shows the process of design and installation of a roof test bench to characterize the performance of three vertical axis wind turbines in continuous operation under real atmospheric conditions. During the structural design of the bench, the loads to which the structure is subjected due to the effect of wind forces under normal and extreme operating conditions were analyzed. Additionally, the bench's electrical system was designed, which is fundamental for the characterization of turbine performance. This electrical system was designed with requirements for the reduction of electrical losses, the installation of sensors and the protection of electronic elements against environmental conditions.*

*The proposed test bench design was built and installed on the terrace of the laboratory building at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. This test bench is currently the fundamental tool to validate the operation in real conditions of prototypes of commercial vertical axis wind turbines and those in process of design by the research group DSIM (Sustainable Design in Mechanical Engineering, by its name in Spanish). The electrical power generated by the turbines can be measured in the test bench and the speed of rotation of the turbines, data, which in combination with measurements of wind speed acquired by a meteorological station, are the input for the characterization of the performance of Vertical axis wind turbines.*

**Keywords:** vertical axis wind turbine; vawt; metallic structure; testing bench; mechanical design

### **Introducción**

El desarrollo tecnológico actual de la humanidad requiere el consumo de grandes cantidades de energía para su funcionamiento, lo cual, ha derivado en el agotamiento de las reservas energéticas y en la dependencia de quema de combustibles fósiles, generando graves problemas ambientales. Como respuesta a este problema, la búsqueda de fuentes sostenibles de energía es un tema de investigación fundamental en la actualidad y en este camino, el recurso eólico, aprovechado mediante la generación de energía usando turbinas, es uno de los campos más prometedores.

En el contexto colombiano, el acceso a la energía eléctrica es aún una necesidad fundamental por resolver. La gran cantidad de zonas no interconectadas y la dificultad de proponer una solución sostenible en el corto plazo para incluir zonas apartadas al sistema interconectado nacional, requiere el uso de tecnologías alternativas. Por lo tanto, el diseño e implementación de turbinas eólicas, que permitan aprovechar los regímenes de viento disponibles en estas zonas, es un tema de investigación.

Dentro de las posibles soluciones se destacan las turbinas eólicas de eje vertical, por su capacidad de aprovechar regímenes de viento de baja velocidad (por debajo de 20m/s) como los encontrados a lo largo del territorio colombiano. Sin embargo, su desarrollo y adaptación a condiciones específicas aún es un tema de investigación, ya que, no se han innovado nuevas tecnologías en este tema. El diseño de nuevos rotores y optimización de sus parámetros geométricos es fundamental para la obtención de nuevos modelos, eficientes y funcionales a bajas velocidades de viento.

Para poder realizar la caracterización y validación de estos aerogeneradores en condiciones reales de operación, es necesario el diseño y construcción de un banco de pruebas en el cual se puedan medir los principales parámetros de entrada (velocidad de viento), operación (velocidad de rotación de la turbina) y de salida (corriente, voltaje generados) en diferentes configuraciones de carga. De esta manera determinar la relación entre la potencia eólica disponible y la potencia eléctrica generada con diferentes regímenes de operación es primordial para determinar la funcionalidad de estos aerogeneradores en el territorio colombiano.

## **1. Estado del arte**

En la literatura se encuentran varias fuentes de información acerca de las estructuras de soporte para turbinas a nivel comercial, mientras que para nivel de investigación y desarrollo es muy poca dicha información. En la figura 1, se muestran los principales tipos de estructura que se utilizan a nivel comercial: estructuras tubular o de única sección, estructuras tipo celosía, estructuras atirantadas y estructuras mixtas que incluyen la combinación de diferentes tipos de los mostrados anteriormente. (Danish Wind Industry Association, 2003) Dichas turbinas tienen algunos requerimientos conceptuales de diseño que se pueden utilizar también en turbinas de eje vertical y se encuentran en la norma IEC 61400-12. (IEC 61400-12-1:2017, 2017)

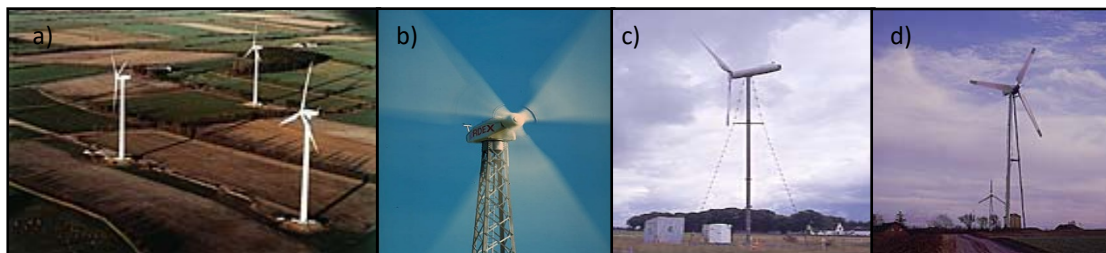


Figura 1. Tipos de estructuras. a) Estructuras tubular, b) Estructuras tipo celosía, c) Estructuras atirantadas y d) Estructuras mixtas. Tomado de (Danish Wind Industry Association, 2003)

Para seleccionar uno u otro tipo de estructura se requiere determinar los diferentes requisitos funcionales, especialmente los requisitos de carga. A nivel nacional, se aplican los requisitos definidos en la Norma Sismo-Resistente NSR -10 (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 1997) que incluye un metodología para estimar cargas por viento en diferentes elementos estructurales, en el capítulo B6. Dicha metodología presenta cómo referencia estimaciones de viento para diferentes lugares del país, ver Figura 2.

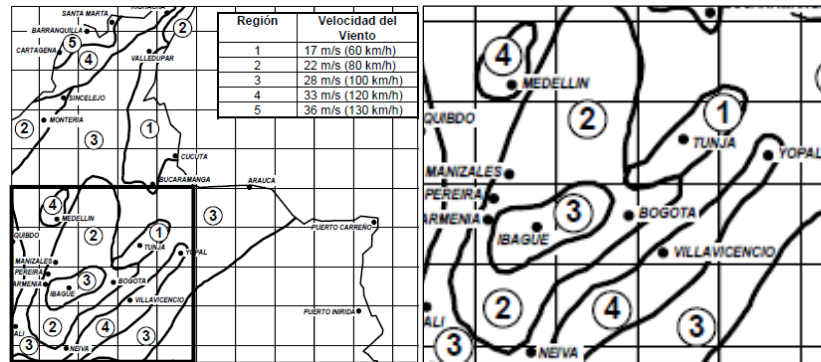


Figura 2. Velocidad viento en Colombia. (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 1997)

Calcular la potencia eólica es primordial, como dato de entrada en el proceso de determinar el desempeño de una turbina. En el mercado se encuentran diferentes sistemas, entre estos las estaciones meteorológicas, que permiten conocer la dirección, humedad, temperatura, la velocidad de viento, entre otros, que se tiene en un determinado lugar y de esta manera calcular la Potencia eólica, con la ecuación 1.

$$Pe = \frac{1}{2} A\rho V^3 \quad (1) \text{ (Kalmikov, 2017)}$$

Donde: A= área de contacto [m<sup>2</sup>]; ρ= Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]; V= Velocidad de viento [m/s]

Para estimar la potencia mecánica, se requiere, principalmente de un tacómetro para medir la velocidad angular y un medidor de torque, de esta manera se puede determinar la potencia mecánica partiendo de la ecuación 2.

$$P_{mecanica} = W * T \quad (2) \text{ (Hugh D., Roger A., & A. Lewis, 2009)}$$

Donde: W= Velocidad angular [rad/s]; T= Par [Nm]

La potencia eléctrica generada se puede calcular conociendo valores de voltaje y corriente en un circuito con carga que sea alimentado por el generador conectado a la turbina. Dicha potencia pueda calcularse con la ecuación 3.

$$P_{electrica} = V * I \quad (3) \text{ (Hugh D. et al., 2009)}$$

Donde: V= Voltaje [V]; I= Corriente [A]

## **2. Metodología**

Se aplica un proceso de diseño prescriptivo, que incluyen 4 etapas principales: definición de especificaciones, diseño conceptual, diseño detallado, y, fabricación y pruebas. En la primera etapa con la información de atributos de diseño obtenida de los usuarios de la estructura, se obtienen las especificaciones del equipo requerido y las funciones principales. Posteriormente, en la fase de diseño conceptual, se utilizan diferentes técnicas para obtener varias soluciones generales, que permiten profundizar en las funciones principales, detallar las variables, sus interrelaciones, y realizar una primera validación de las soluciones con los usuarios. Utilizando las prioridades de los objetivos y funciones, se evalúan y organizan las diferentes soluciones permitiendo seleccionar la mejor de acuerdo con las especificaciones.

En la fase de diseño detallado apoyado en cálculos de ingeniería, validaciones en Software de Diseño con modelos en 3D, y validaciones cuantitativas y de costos; se obtienen los planos finales del sistema, documentos de fabricación, las especificaciones de materiales, los manuales de montaje y procedimientos de prueba. Con la anterior información se procede a la fabricación y su seguimiento y se finaliza con los protocolos de prueba y ajustes finales.

## **3. Atributos y Especificaciones de diseño**

La estructura a diseñar debe estar en la capacidad de soportar el peso y las reacciones de operación de tres aerogeneradores y sus accesorios colocados simultáneamente, ubicar dichas turbinas a una altura de al menos 3 metros de la superficie de cubierta y debe tener un sistema de posicionamiento para dos estados: posición de operación a la altura mínima especificada y posición de mantenimiento para fácil montaje, mantenimiento y desmontaje de los aerogeneradores y sus accesorios.

Por otro lado, para estimar las potencias generadas, es necesario el desarrollo de un sistema de medición y adquisición de datos. Dicho sistema debe ser capaz de estimar la potencia eléctrica generada por la turbina, la velocidad de rotación, y coleccionar la información para diferentes configuraciones de carga en función de los diferentes regímenes de viento que se obtienen de la exposición de las turbinas a condiciones reales de operación.

Los anteriores atributos de diseño junto con otros derivados del proceso de desarrollo, se coleccionaron realizando listas de atributos, detallando los requisitos y esquematizando las funciones. En la figura 3, se puede ver el esquema de caja negra, que resume las variables de entrada y salida generales del banco, para posteriormente detallar las funciones y subfunciones a tener en cuenta en el diseño.

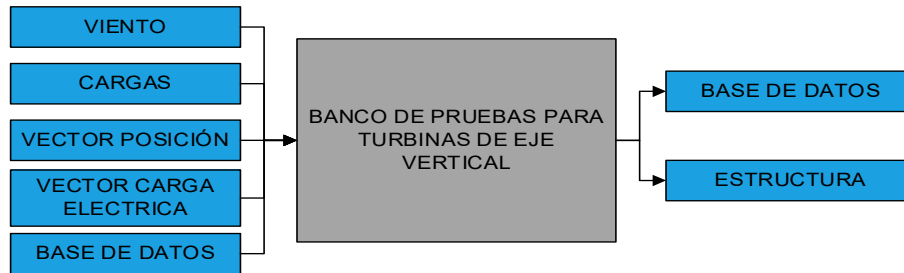


Figura 3. Diagrama de caja negra.

Con el fin de determinar las características del banco, es necesario analizar cada una de las entradas para poder proponer posibles soluciones y evaluar cuál es la que más apropiada para satisfacer la necesidad. La norma IEC 61400-12 presenta diversos requerimientos conceptuales para turbinas de eje horizontal que pueden aplicar para el sistema a diseñar. En primer lugar, está el vector de posición en donde se tiene en cuenta los siguientes factores:

**Altura.** Se requiere que la estación meteorológica se encuentre a 0.75m. sobre cualquier estructura como mínimo, para evitar la obstrucción del viento, basándose en la norma (IEC 61400-12-1:2017, 2017). Lo anterior define la posición mínima de la estación y del centroide de las turbinas debido a que estas deben estar a la misma altura, con el fin de dar más confiabilidad a la hora de calcular la potencia eólica a partir de la medición de velocidad de la estación. Con este criterio se determina que la altura de posicionamiento del centroide de las turbinas se localizadas a una altura de 3.5m sobre el tejado del edificio, lo cual se puede evidenciar en la figura 4. Además, para tener la capacidad de obtener medidas más confiables, esta misma norma dice que el montaje de la estación meteorológica se debe encontrar a una distancia máxima de 2.5 veces el diámetro de los aerogeneradores, en una vista en planta.

**Configuración o disposición.** Para la forma de realizar el montaje, se evaluó la sugerencias de la norma IEC 61400-12 y Shaheen que indican que entre las turbinas debe existir una distancia de separación mínima de 1.2 veces el diámetro (Shaheen & Abdallah, 2016), lo anterior, con el fin de reducir la interferencia. Se generaron tres posibles configuraciones, ver figura 5, lineal, una al lado de la otra y triangular. Estos criterios de selección dependen de la variación de la dirección del viento y efectos de interferencia.

**Cargas.** Para determinar las cargas a las que va estar sometida la estructura, se usó el procedimiento del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR10 capítulo B6 Cargas de viento. Conociendo de la figura 2 que el régimen de viento de la región es de 22m/s, lo cual se validó con datos históricos tomados de las estaciones meteorológicas cercanas a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y de acuerdo a las áreas proyectadas de cada turbina, se calcularon cargas de 400N aplicadas en el centroide de estas. Además de soportar una masa promedio de 30kg de un aerogenerador comercial, Condiciones ambientales, Lluvia, vientos variables, polvo y residuos orgánicos.

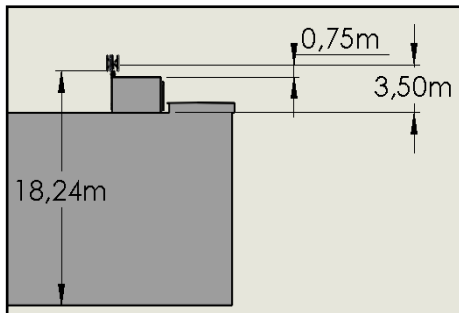


Figura 4. Diagrama de altura

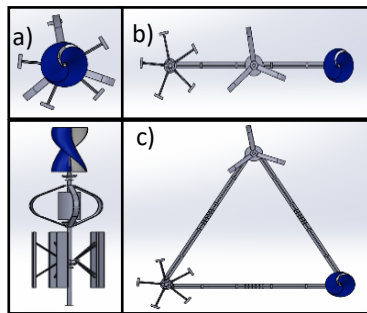


Figura 5. Configuración de instalación

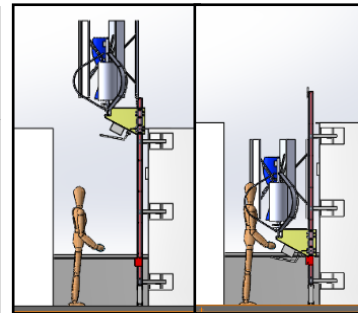


Figura 6. Diagrama de posiciones

Condiciones ergonómicas de operación. El banco debe contar dos posiciones, una en la cual los aerogeneradores se encuentran en su punto de funcionamiento y otra de mantenimiento, en la cual se deben montar y desmontar las turbinas de manera fácil y sin riesgos en el espacio designado para la ubicación de banco, ver figura 6. Para esto se tomó la norma (NTC 5693) la que indica que la altura para un buen manejo de cargas y trabajo es de 0.7 a 1m sobre el suelo. (Icontec Internacional, 2009)

Requisitos de accesorios. Sensores, cajas, cables, etc. Por otra parte, se requiere soportar algunas partes del sistema de control, entre otros: cableado, ubicación de los componentes y protección a la intemperie de todos los componentes para adquirir los datos de generación, velocidad de viento y velocidad de giro del aerogenerador. El sistema eléctrico de transmisión de datos eléctricos debe generar las mínimas pérdidas posibles, para esto es necesario la selección detallada de los cables que se usarán en el sistema, teniendo en cuenta la longitud que estos tendrán.

#### 4. Diseño conceptual y detallado

Para cumplir con los requerimientos de diseño, se realiza la propuesta y posterior selección de las siguientes alternativas:

- Mecanismo cuatro barras de dos posiciones: El cual consiste en una columna principal sujeta a otra columna del edificio mediante un sistema de tornillos que están ubicados en tres puntos. Además de una viga en la cual van a estar colocados los aerogeneradores. Un mecanismo cuatro barras que mediante un polipasto manual permite llevar el mecanismo de la posición de mantenimiento al de operación.
- Sistema de riel vertical: Este sistema consiste en un riel vertical, en el cual se colocarán las 3 turbinas una sobre otra y mediante un polipasto mecánico se accionara para hacerlas subir hasta la posición de operación.
- Estructura de Riel: Sistema de riel vertical el cual se sujeta mediante soldadura a la columna del edificio, en el cual se desliza un brazo, al cual esta sujeta una viga en el cual se sostienen las turbinas. Este mecanismo es accionado por un polipasto mecánico. El mecanismo consta de diferentes puntos de apoyo a lo largo del riel para poder variar fácilmente la altura. Además, un sistema de tensores que evitan vibraciones en los puntos más alejados del centro.

Las tres opciones cuentan con un sistema de cableado y cajas eléctricas en las cuales llegarán todos la señales y datos los cuales serán procesados para generar una base de datos con la información de potencia generada y consumida. Este sistema eléctrico constara de cables, los cuales, para las corrientes y voltajes que se van a trabajar se debe seleccionar el calibre del conductor, lo cual permite evitar la colocación de un tablero de transformadores para restablecer la tensión necesaria, además, para la adquisición de datos, es posible realizar el cálculo de potencia de manera directa. Los cables serán conectados a cada generador trifásico, por lo que se requiere 3 cables por generador además de un cable de tierra y los cableados de control para sensores. Estos cables serán conducidos desde la estructura hasta la caja principal y por medio de ductos flexibles y rígidos con sus accesorios de inspección. En la caja principal se cuenta con 3 controladores, uno por cada turbina y el sistema de adquisición de datos.

Teniendo estas alternativas y los requerimientos para el funcionamiento se analizaron las tres opciones de las cuales se descartaron las dos primeras. La primera por motivos de espacio en la ubicación de instalación debido a que el mecanismo requería brazos largos, los cuales a la hora de realizar el montaje y operación generaban diversos problemas.

La segunda opción se descartó ya que al poner las turbinas una sobre la otra, no se puede considerar similares condiciones de viento para las tres turbinas, ya que a mayor altura las condiciones cambian, además la turbina que se encuentra en la posición más alta en el proceso de instalación se encuentra a una altura de aproximadamente 2 metros lo cual no correspondía con el requisito ergonómico.

La tercera fue la opción que cumple con los requerimientos de espacio, fácil accionamiento y mayor resistencia a las cargas a la que está sometida, y, por su geometría, se podrá analizar de una mejor manera la interferencia que se genera al tener las tres turbinas en línea cuando el viento es paralelo al riel, pudiendo compararse cuando el viento tenga una dirección perpendicular al riel. Para esta opción se genera el diagrama de caja transparente, figura 7, donde se muestran las diferentes entradas y salidas, sus interacciones para cumplir con las funciones requeridas. Luego de procesar todos los datos que ingresan al sistema, se obtiene una base de datos con la información de potencia eólica, mecánica, eléctrica y una estructura capaz de resistir las cargas cumpliendo los requisitos planteados.

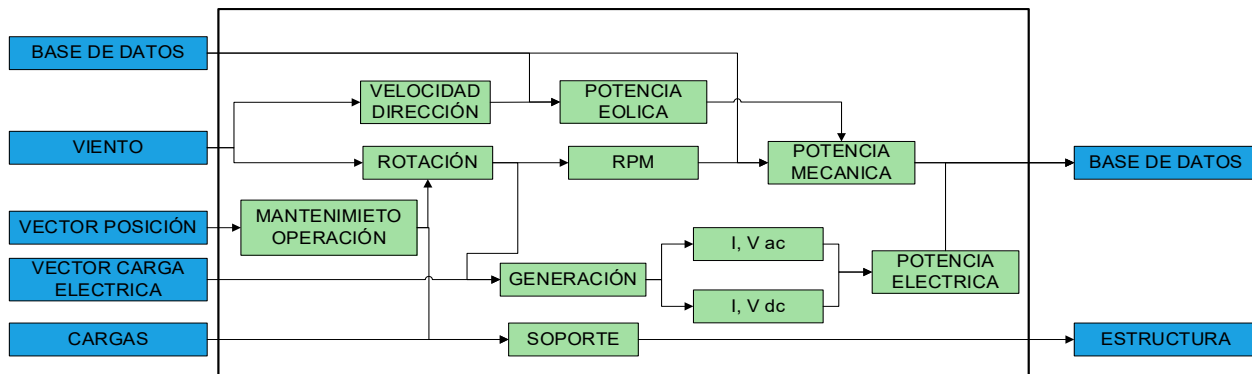


Figura 7. Diagrama caja transparente



## 5. Diseño detallado y Resultados

Como resultado del proceso de diseño detallado se tiene el sistema de adquisición de datos y la estructura en el cual se puede observar en la figura 8. Adicionalmente, se realizó el montaje de una estación meteorológica (Ambient Weather WS2902) con la cual se adquieren los datos de velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura y que funciona mediante una red inalámbrica que transmite los datos a un servidor para luego ser descargados. Esta estación cumple con el requerimiento de estar ubicada en el rango establecido de 2.5 veces el diámetro de las turbinas y una altura de 0.75m sobre cualquier estructura, para mejorar la precisión de los datos adquiridos.

El diseño detallado de la estructura consiste de un riel principal que tiene la función de permitir el deslizamiento y posicionamiento vertical de la estructura móvil. Dicho riel está construido de dos perfiles en C de acero A572 Gr. 50, unidos mediante láminas que rigidizan, sirven como apoyos y permiten diferentes puntos de fijación de la estructura móvil. La estructura móvil consiste en dos partes: el brazo y el riel secundario.

El brazo es una pieza de una forma triangular que transfiere las cargas del riel secundario al riel principal y se conecta al riel principal por medio de roldanas que permiten el movimiento relativo entre las dos partes en la dirección vertical y por medio de láminas de desgaste que restringen el movimiento horizontal. En esta pieza también se encuentra el sistema de seguridad y anclaje de la estructura móvil, que es una corredera accionada mediante resortes que entra en medio del riel principal y descansa en las láminas de unión. El brazo se mueve verticalmente accionando un polipasto mecánico de 2000lb, el cual puede ser manipulado con facilidad por una persona ya que la fuerza requerida para elevar la estructura es de 50N.

El riel secundario está construido con dos perfiles en c espalda-espalda, con un espacio en ellos que se utiliza para resguardar los ductos de cableado. En este riel se ubicaron las turbinas con una separación de 1.2 veces el diámetro de la más grande cumpliendo los requisitos respectivos. Para limitar los posibles efectos vibratorios originados en la naturaleza rotatoria de las turbinas, se calculó un sistema de tensores que conectan los extremos del riel secundario a los puntos de fijación del riel principal, limitando las oscilaciones que se pudieran presentar.

El cableado de todo el sistema de adquisición comienza en las turbinas, de donde salen cuatro cables potencia y un cable UTP por cada turbina. Los cables de potencia conducen la energía generada en un sistema trifásico trifilar con protección y el cable UTP se utiliza para coleccionar la señal de los sensores de velocidad y reserva para futuros sensores. Todos los cables llegan a la caja principal, ubicada en el tercer piso del edificio, en donde se encuentran los accesorios de captura y almacenamiento de datos de acuerdo al esquema mostrado en la figura 8b. Los datos adquiridos se almacenan periódicamente en una base de datos para su posterior unificación con los datos de velocidad de viento y correspondiente análisis.

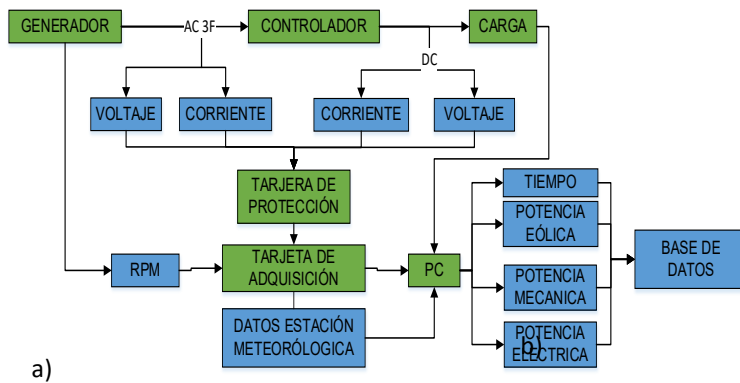


Figura 8. a) Montaje final en Techo, b) Circuito de toma de datos.



## 6. Conclusiones

- Aplicando una metodología de Diseño prescriptiva, se obtuvo un diseño detallado que cumple con las especificaciones iniciales y las definidas en el proceso de diseño del banco de pruebas de turbinas.
- Se desarrolló y aplicó un método para el diseño de estructuras de soporte para turbinas de eje vertical, teniendo en cuenta los requisitos de normas técnicas colombianas y las especificaciones conceptuales de normas específicas de aerogeneradores.
- Con el fin de determinar el desempeño de las turbinas, se planteó y desarrollo una forma de medir, coleccionar y almacenar datos, que, combinados con las características aleatorias de las variables relacionadas con el viento, permiten estimar para diferentes configuraciones de carga eléctrica, la potencia mecánica y eléctrica generadas.
- Con la ayuda del banco desarrollado es posible aplicar diversas pruebas en entorno reales de viento a diferentes configuraciones de turbinas de eje vertical.
- El montaje del banco de turbinas de eje vertical y el sistema de adquisición de datos, va a permitir caracterizar los aerogeneradores en entorno reales, relacionando especialmente los aspectos geométricos con el desempeño.
- La implementación del banco permitirá determinar diseños más eficientes y aprovechables en regímenes de viento de baja velocidad para zonas no interconectadas, en donde el

recurso eólico es una de las mejores formas de sustituir las plantas eléctricas que funcionan con hidrocarburos.

- El desarrollo realizado permite generar parámetros de diseño para las estructuras individuales de las estaciones de generación que sean desarrolladas. Dichos parámetros están relacionados con las ubicaciones geográficas de operación, análisis de las cargas dinámicas sobre la estructura, condiciones de anclaje, entre otros.

## 7. Referencias

### Artículos de revistas

- Kalmikov, A. (2017). Wind Power Fundamentals. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, (December 2017), pp. 4.
- Shaheen, M., & Abdallah, S. (2016). Development of efficient vertical axis wind turbine clustered farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, pp. 237–244.

### Libros

- Hugh D., Y., Roger A., F., & A. Lewis, F. (2009). *Física Universitaria Vol. 1 con física moderna. 2*, pp. 633.
- Hugh D., Y., Roger A., F., & A. Lewis, F. (2009). *Física Universitaria Vol. 2 con física moderna. 2*, pp. 863
- Icontec Internacional. (2009). *Ergonomía. Manipulación Manual. Parte 1: Levantamiento Y Transporte*. (571).
- IEC 61400-12-1:2017. (2017). IEC 61400-12-1:2017 Wind energy generation systems – Power performance measurements of electricity producing wind turbines. *International Standard, 2005*
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). NSR-10 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, pp.B39.

### Fuentes electrónicas

- Danish Wind Industry Association. (2003). Wind Turbine Towers. Windpower, pp. 1–4. En [http://drønmstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower\\_web/en/tour/wtrb/tower.htm](http://drønmstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower_web/en/tour/wtrb/tower.htm)

### Sobre los autores

- **Ángela Bermúdez:** Ing. Materiales, PhD en Ciencia de Materiales. Profesor Asistente, Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [angela.bermudez@escuelaing.edu.co](mailto:angela.bermudez@escuelaing.edu.co)
- **Javier Andrés Urbano Tole:** Ingeniero Mecánico, Especialista en gestión de Proyectos de Ingeniería, Máster en Ingeniería Mecánica. Profesor Asistente, Grupo de investigación

DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [javier.urbano@escuelaing.edu.co](mailto:javier.urbano@escuelaing.edu.co)

- **Camilo Hernández Acevedo:** Ing. Mecánico, PhD en Ingeniería Mecánica. Profesor Asistente, Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [camilo.hernandez@escuelaing.edu.co](mailto:camilo.hernandez@escuelaing.edu.co)
- **Miguel Fernando Montoya Vallejo:** Ing. Mecánico, PhD en Ingeniería Mecánica. Profesor Asistente, Líder Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [miguel.montoyav@escuelaing.edu.co](mailto:miguel.montoyav@escuelaing.edu.co)
- **Cristian Pachón,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [cristian.pachon-b@mail.escuelaing.edu.co](mailto:cristian.pachon-b@mail.escuelaing.edu.co)
- **Sebastián Cortés,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [juan.cortes-r@mail.escuelaing.edu.co](mailto:juan.cortes-r@mail.escuelaing.edu.co)
- **Nicolás Cuevas,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [nicolas.cuevas@mail.escuelaing.edu.co](mailto:nicolas.cuevas@mail.escuelaing.edu.co)
- **Sebastián Cancelado,** Estudiante Ing. Mecánica, Semillerista Grupo de investigación DSIM-Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá). [sebastian.cancelado@mail.escuelaing.edu.co](mailto:sebastian.cancelado@mail.escuelaing.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)